

Modélisation éléments finis du comportement vibratoire d'un immeuble en bois

MASSOUMI Sina¹, BOUDAUD Clément¹, FLAMAND Olivier², MANTHEY Manuel²

¹ LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois (ESB), France

² Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), France

clement.boudaud@esb-campus.fr

Mots clefs : Immeuble en bois ; Vibrations ; Modèle éléments finis

Contexte et objectifs

L'ESB et le CSTB travaillent depuis plusieurs années à l'étude du comportement dynamique des bâtiments de belle hauteur en bois soumis aux efforts de vent (en termes de confort : état limite de service), via une approche expérimentale sur des bâtiments. En cumulé, les campagnes de mesures (DynaTTB (Abrahamsen et al 2020), EVIBois (Janot et al 2025a) et ADIVBois (Lanata et Boudaud 2020)) regroupent 7 bâtiments en France que l'on peut distinguer ainsi :

- Hauteurs (R+2 à R+16),
- Principes constructifs (CLT, poteau/poutre, avec ou sans noyau béton...),
- Protocoles de mesures (un ou plusieurs jours de collecte de données, mesure continue dans le temps ou ponctuelle),
- Sollicitations (vibrations ambiantes, forcées),
- Phases de vie du bâti (construction (gros œuvre, 2nd œuvre) ou exploitation)
- Mesures des conditions environnementales extérieures (absentes, température, humidité relative de l'air, vitesse et direction du vent...),
- Mesures de conditions environnementales intérieures (absentes, températures et humidité relative de l'air).
- Méthodes d'analyse pour l'estimation de l'amortissement (FFT⁵ sur oscillations libres après oscillations forcées, EFDD⁶, CFDD⁷, RDT⁸)

La richesse des données collectées n'a jamais été exploitée en vue d'obtenir une base de données commune, comprenant différentes typologies de bâtiment, de principes constructifs, de méthodes d'analyse et de résultats partagés.

Le projet VIBBOIS vise à partager ces expériences et connaissances dans le cadre d'un post-doctorat avec les objectifs suivants :

- Alimenter et uniformiser la base de données des amortissements mesurés *in-situ* pour différents systèmes constructifs et comprendre les paramètres impactant (notamment la vitesse du vent).
- Développer le modèle numérique du Haut-Bois⁹, bâtiment pour lequel les données sont les plus riches (vibrations et conditions environnementales externes et internes mesurées en continu sur 3 ans). Le but est d'identifier les choix de modélisations nécessaires à la bonne

⁵ Fast Fourier Transform

⁶ Enhanced Frequency Domain Decomposition

⁷ Curve-fit Frequency Domain Decomposition

⁸ Random Decrement Technique

⁹ Objet d'étude d'EVIBois, les laboratoires 3SR et ISTerre restent impliqués dans le suivi scientifique du projet VIBBOIS

estimation des fréquences et déformées modales (masses et/ou raideurs des éléments de 2nd œuvre, semi-rigidités des assemblages, raideur de l'interaction sol/structure...).

Ces objectifs participent à une meilleure compréhension des phénomènes vibratoires dans des systèmes complexes (bâtiments) composés en partie d'éléments en bois. Cela participe à l'identification de phénomènes mécaniques mal compris, comme la baisse de l'amortissement avec l'augmentation de l'énergie de vibration à très faible amplitude (Janot et al 2025b, Reynolds 2011). Cela participe aussi à formaliser les éléments clés d'un guide de modélisation numérique à destination des BET¹⁰. La présente communication se focalise sur la modélisation numérique.

Matériel et méthode

L'immeuble Haut-Bois (HBB8), situé à Grenoble, est un bâtiment R+8 réalisé en panneaux CLT selon un système en voiles porteurs type « balloon frame », sans noyau en béton. Le bâtiment mesure 28 mètres de hauteur, une base au sol de 16 × 21 mètres, et est séparé d'un escalier extérieur en béton par des joints sismiques de 14 cm. Une description plus détaillée du bâtiment est consultable dans Janot et al 2025a. Deux types de mesures (vibrations et environnement) ont été réalisées depuis la phase chantier jusqu'à la mise en service.

Vibrations

Trois mesures des vibrations ambiantes en tête du bâtiment ont été réalisées grâce à un vélocimètre à différentes étapes de la fin du gros œuvre et début du second œuvre (dataset 1), cela permet de connaître les fréquences modales (transformée de Fourier). Deux mois après l'installation des occupants, une Analyse Modale Opérationnelle (AMO), nommée dataset 3, permet de connaître les fréquences modales (FDD), mais aussi les déformées modales. Une dernière mesure ponctuelle, toujours à l'aide de vélocimètres, posés cette fois dans le Haut-Bois et dans la cage d'escalier en béton, a permis d'étudier l'effet du joint de dilatation entre les deux bâtis (dataset 4).

En parallèle, trois vélocimètres ont été placés au sommet du bâtiment pour mesurer les vibrations ambiantes en continu. Les mesures débutent alors que le chantier est en phase 2nd œuvre et vont se poursuivre pendant 4 ans (dataset 2). Six mois après le début, un vélocimètre a été ajouté dans les fondations du bâtiment. Ces mesures permettent de connaître les évolutions des fréquences (FDD) et des amortissements (RDT) modaux tout au long de la fin de la phase chantier, de l'installation des occupants et de l'exploitation du bâtiment.

Environnement

Les conditions de l'environnement extérieur sont mesurées par une station météo installée sur le toit d'un immeuble voisin. Débutées en même temps que les mesures vibratoires continues (dataset 2), la température et l'humidité relative de l'air, ainsi que la vitesse et la direction du vent sont enregistrées en continu. Enfin, un accès aux données de la CTA¹¹ permet de connaître les températures et humidités relatives de l'air dans plusieurs logements, sur une période de 2,5 ans à partir de l'installation des occupants.

L'ensemble de ces mesures offre une base idéale pour la comparaison avec un modèle numérique, car nous disposons des fréquences et de leurs variations dans le temps selon la masse ajoutée, les conditions météorologiques et le niveau d'occupation, ainsi que dans certains cas de déformées modales.

¹⁰ Bureau d'Etudes Techniques

¹¹ Centrale de Traitement de l'Air

Modélisation numérique par éléments finis

Le modèle numérique du bâtiment Haut-Bois a été développé sous ANSYS selon une approche Eléments Finis (EF), avec pour objectif de reproduire le comportement dynamique mesuré expérimentalement tout au long de la vie de l'ouvrage (chantier, mise en service, usage).

La première étape a consisté à valider séparément les éléments structuraux dans des cas tests simples avant de construire le modèle global. Les panneaux CLT ont été modélisés à l'aide d'une approche multicouche, chaque pli étant défini avec son orientation ($0^\circ/90^\circ$) et ses propriétés orthotropes spécifiques. Cette stratégie permet de reproduire finement les effets d'anisotropie et le cisaillement transversal propre au CLT. Les planchers et les murs ont été modélisés avec des éléments coques, compatibles avec les géométries minces des panneaux. Les poutres et poteaux, en bois lamellé-collé ou en acier, ont été modélisés à l'aide d'éléments barres, et leur comportement a été vérifié par comparaison avec la théorie de Timoshenko pour s'assurer de la bonne prise en compte du cisaillement dans les éléments courts ou de fortes sections.

La seconde étape a consisté à assembler un modèle global 3D du bâtiment. Les liaisons entre panneaux, planchers et poutres ont été définies en fonction des assemblages réels utilisés sur le chantier, avec un choix de conditions limites (liaison rigide ou articulée) basé sur la documentation du projet et ajusté si besoin pour correspondre aux observations expérimentales. Les données géométriques proviennent des plans du projet, tandis que les propriétés mécaniques ont été extraites des normes associées ou des données fournies par les fabricants quand disponibles. Les masses des éléments structuraux et des éléments de 2nd œuvres ont été intégrées selon les estimations du maître d'œuvre et ajustées à partir des variations de fréquences mesurées. La raideur apportée par les éléments de 2nd œuvre a pour l'instant été négligée.

Les fondations ont été représentées par un réseau de semelles isolées et filantes, liaisonnées entre-elles par des longrines portant une dalle béton. Des ressorts horizontaux et verticaux simulent l'Interaction Sol-Structure (ISS). La raideur de ces ressorts n'étant pas préalablement connue, une étude paramétrique a été menée afin d'approcher ces valeurs en faisant converger les fréquences modales calculées vers les 3 premières fréquences expérimentales. Cette première approche a permis d'avoir une valeur initiale pour ces raideurs. Par la suite des analyses de sensibilité des résultats du modèle à chaque paramètre définit permettent de consolider cette approche.

Pour les paramètres non quantifiables a priori, comme les charges d'exploitation réelles ou la raideur exacte de l'ISS, la méthode retenue repose sur une calibration par méthode inverse : les raideurs ISS sont calées sur les fréquences (F1, F2, F3) avant installation des occupants. Ce qui permet par la suite de déterminer les charges d'exploitation après installation des occupants, sur la base des fréquences (F1, F2, F3) et des déformées modales (D1, D2, D3). L'exigence principale est qu'une fois un paramètre identifié, il est conservé lorsque l'on change de phase.

Résultats et discussions

La comparaison entre les résultats du modèle numérique et les mesures expérimentales réalisées sur le bâtiment Haut-Bois (Tab. 1) montre une bonne concordance sur les trois premiers modes propres, à la fois en termes de fréquence et de forme modale.

Tableau 1 – Comparaison des fréquences entre l'expérience et modèle EF (fin second œuvre)

Mode	Fi exp (Hz)	Fi num (Hz)	Écart relatif (%)
F1 (DirX)	1,92	1,94	1,04 %

Mode	Fi exp (Hz)	Fi num (Hz)	Écart relatif (%)
F2 (DirY)	2,42	2,21	8,68 %
F3 (Torsion)	2,86	2,84	-0,7 %

La Fig. 1 illustre ce premier mode tel qu'il apparaît dans le modèle EF, mettant en évidence une distribution régulière du déplacement horizontal, avec une amplitude maximale en partie supérieure du bâtiment. La forme modale simulée présente une excellente cohérence avec celle mesurée.

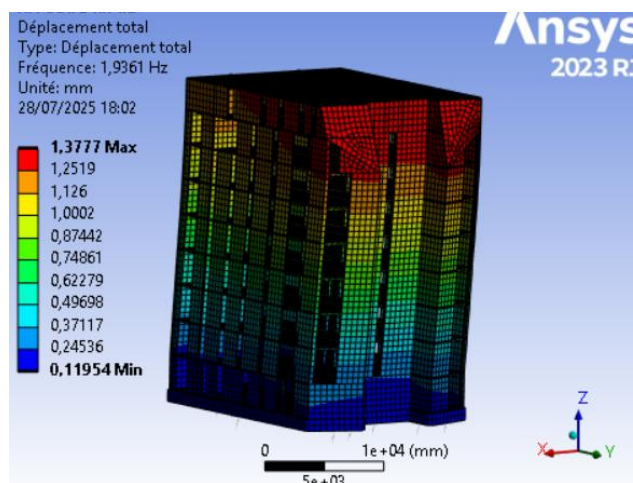


Fig. 1 Représentation du premier mode propre (F1) du bâtiment Haut-Bois simulé sous ANSYS

Pour la raideur ISS, une étude paramétrique a été conduite en faisant varier les constantes des ressorts horizontaux et verticaux représentant le sol. La meilleure a été obtenue avec une raideur équivalente de 8×10^7 N/m verticalement et $8,5 \times 10^6$ N/m horizontalement. La charge d'exploitation caractéristique est de $1,5 \text{ kN/m}^2$ (cat. A Habitation). Dans le modèle numérique, une fraction de 30 % de cette charge a été prise en compte sous forme de masse ajoutée, cette valeur correspond au coefficient ψ_2 des Eurocodes (coefficient de la valeur quasi-permanente d'une action variable). Cette hypothèse a permis d'obtenir des fréquences propres sensiblement plus proches des valeurs mesurées après l'installation des occupants et du mobilier, confirmant la nécessité d'intégrer une part réaliste de charge d'exploitation pour une modélisation dynamique fiable des structures.

Conclusions et perspectives

La comparaison des mesures vibratoires à différentes étapes du chantier et de l'exploitation a montré l'importance de prendre en compte les charges d'exploitation et la raideur sol-structure pour prédire correctement les fréquences modales. L'étude de sensibilité, encore en cours, permettra de caractériser l'influence de l'ensemble des paramètres.

Dans son ensemble, le projet VIBBOIS permettra d'alimenter une base de données regroupant mesures vibratoires et environnementales, afin de mieux comprendre l'évolution des fréquences et amortissements selon les conditions d'usage et les sollicitations extérieures. Ces travaux contribueront à formaliser des recommandations pour la modélisation numérique des bâtiments bois et l'estimation réaliste de l'amortissement.

Remerciements

Remerciements au CODIFAB pour son soutien financier au projet VIBBOIS (B25ESB01).
Remerciements aux laboratoires 3SR et ISTerre pour leur collaboration sur le Haut-Bois.

Références

Abrahamsen R, Flamand O, Manthey M, Bjertnaes MA, Bouillot J, Brank B, Cabaton L, Crocetti R, Tulebekova S (2020) Dynamic response of tall timber buildings under service load: the Dynattb research program. In EUROODYN 2020, XI International Conference on Structural Dynamics, Athens, Greece.

Janot D, Gueguen P, Vieux-Champagne F, Boudaud C (2025b) Intrinsic and Friction Damping in a Mid-Rise Timber Structure Based on Two Years of Ambient Vibration Monitoring, In review.

Janot D, Vieux-Champagne F, Gueguen P, Boudaud C, Jung A (2025a) 8-storey CLT building dynamical properties analysis and monitoring from construction to operating phase, *Materials and Structures*, 58(1), 1-19.

Lanata F, Boudaud C (2020) ADIVbois – B2 – Amortissement BGH Bois, Rapport d'essai.

Reynolds T, Harris R, Chan W.S (2011) Dynamic response of tall timber buildings to wind load. In 35th Annual symposium of IABSE/52nd annual symposium of IASS/6th international conference on space structures, London, UK.